

超音波加振による細管内上下移動カプセル

宇都宮大学 斎藤秀次郎

1. はじめに

カプセル輸送は、通常パイプの内径と同程度の直径を持つ円筒形のカプセルを管内流とともに輸送する方式のことである。作動流体としては、水（液体）及び空気（気体）が利用されており、前者は水力カプセル、後者は空気カプセルと呼ばれている¹⁾。

カプセル輸送の特徴は、長距離輸送ができ、カプセルに詰めればどんな形の物まで輸送が可能であり、環境破壊、騒音、粉塵飛散などの公害が少なく、輸送は天候に左右されないなどの利点がある²⁾。

ところが、現在実用化されているカプセル輸送は、大量輸送方式のカプセル輸送であり、小型で少量のカプセル輸送はあまり見かけない。しかも、カプセル輸送は、都市部よりも郊外のほうに設置されていることが多い。そこで例えば、輸送物資として宝石や薬物、微量の検査資料など、少量の近距離輸送や建物の壁の中をカプセル輸送すれば、人の目に触れることなく、安全に物を搬送することができるのではないかと考えられる。

しかし、カプセル輸送の作動流体に水などを使った場合は、水の濡れを嫌う物は送れないし、空気を利用したカプセル輸送では、物資を上昇搬送させるには大きな空気圧力の推力が必要とされ、負担が大きいと思われる。そこで本研究は、新しいカプセル輸送の作動媒体として、振動の力を利用する。この方法は、パイプに振動を与えて、外部から外力を与えることで、パイプ内部を走行するカプセルに移動推力を与える。しかも少量輸送のカプセル輸送を目的としており、パイプ自体は内径の小さい細いパイプであり、細管内のカプセル輸送を目的としている。そして、細管を振動させてカプセルを上下移動させている。

さらに本カプセル移動方法は、細管の途中

から管を振動させてカプセル移動させることができる方法である。この方法は、細管を振動させる加振器を細管の途中に設置して、カプセルが通過する時だけ細管を振動させればいいので、パイプライン全体に水や空気を流す方法よりも大変効率が良いと思われる。

以下に、試作したカプセルの構造を示し、カプセルを使った細管内の上下移動実験を行ったので、その結果を報告し、考察を述べる。

2. カプセルの構造

製作したカプセルの構造を図1に示す。図1は、外径3.5mm、長さ5.0mmのポリプロピレン製円筒の片端に、厚さ25 μ m、直径6.0mmのアルミニウム円板を接着剤で接着した。もう一方の片端には、厚さ30 μ m、幅3mm、折り曲げた状態での長さ6.9mmのりん青銅板も接着剤で接着した。りん青銅板の上部側は、円筒軸から100°の角度で曲げてあり、下部側は、円筒軸の垂直方向から48°の角度で曲げてある。本カプセルの自重は約31mgであり、細管内を移動するので、形状は大変小さくて軽い。

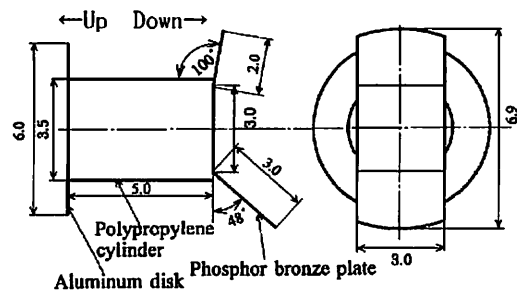


図1 カプセルの構造

3. 細管加振装置

図2に細管の加振装置を示す。カプセルが上下移動する細管には、なめらかで摩擦係数

の小さい、内径 7mm の透明ガラス細管を使用した。この細管を支持台を使って垂直方向に立て、上下 120mm の間を開けて固定した。細管に超音波加振器を中間の上下 60mm の位置に接触させて支持台に固定した。超音波加振器(以後は加振器と呼ぶ)には、ボルト締めランジュバン型超音波振動子(DA21540F, コウワ技研)を使用した。支持台は全て定盤の上に設置した。

次に、加振器に印加する電圧は、発振器から 40kHz の方形波電圧を出力し、出力電圧をバースト波出力にするために、別の発振器から間欠パルスを発振して、40kHz の方形波電圧に加えてバースト波出力とする。そして、バースト波出力電圧をアンプで 10 倍に増幅して、加振器に入力し、加振器を振動させて、細管を加振する⁽³⁾。

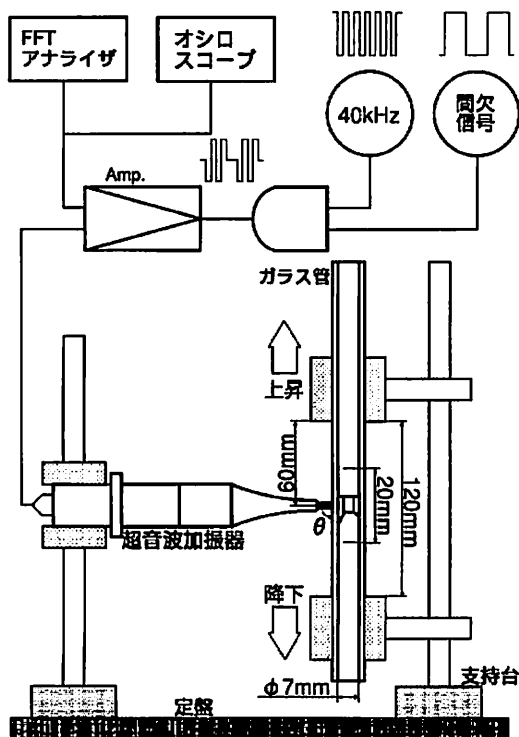


図2 細管加振装置

4. 上下移動速度とバーストパルスの間欠周波数変化

本章では、バーストパルスの間欠周波数を

変化させたときの、カプセルの上下移動速度の変化を調べる実験を行った。

その実験方法は、加振器と細管の接触角度を垂直に固定して、加振器の先端を細管に接触させる。加振器の印加電圧を $80V_{p-p}$ に固定し、カプセルを細管内に挿入して、加振器で細管を加振して上下移動を確認する。カプセルは上昇時には加振器の加振点の下方 10mm を、降下時には加振点の上方 10mm を初期位置とする。そして、カプセルが 20mm 移動するためにかかった時間を測定する。これを 5 回繰り返してその平均の移動速度を求める。この繰り返しの間欠周波数が 0kHz から 40kHz までの範囲を 2.5kHz 間隔で与え、カプセルの上下移動速度の測定実験を行う。

その実験結果を図3に示す。図3の縦軸は上下移動速度(mm/s)、横軸は間欠周波数(kHz)を表す。図3の結果から、間欠周波数の変化によって上下移動方向が変化していることがわかる。

間欠周波数が 7.5kHz、15.0kHz、32.5kHz のときカプセルは降下移動し、その他の周波数では、カプセルは上昇した。

上昇移動では、間欠周波数が 0kHz では、高速で安定した上昇を示している。降下移動では、間欠周波数が 7.5kHz のとき、高速で安定した降下移動を示している。

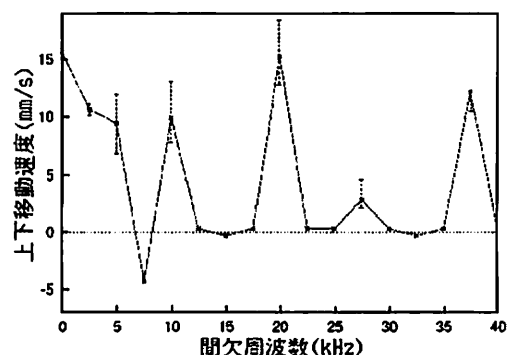


図3 間欠周波数と上昇速度の関係

5. 加振器の接触角度と上下移動速度の変化

次に、加振器の印加電圧を $80V_{p-p}$ に固定し、加振器と細管との接触角度を変化させ、カプセルの上下移動速度の変化を測定する実験を行った。その実験方法は、加振器を細管に垂直方向にセットし、加振器の先端を細管に接触させる。カプセルを細管に挿入し、上昇時は加振器の下方 10mm、降下時は加振器の上方 10mm にカプセルを停止させる。細管を加振して、カプセルが 20mm 移動するのにかかった時間を測定する。計測時間から移動速度を算出する。この計測を 5 回繰り返して、平均の移動速度を求める。この実験を加振器の接触角度を 60° から 120° まで 10° 間隔で変化させて実験を行った。

5-1 接触角度と上昇速度との関係

加振器の接触角度と上昇速度との関係を調べるため、上記の実験方法に間欠パルスは入力しないで、40kHz の連続パルスを加振器に入力して実験を行った。その実験結果を図 4 に示す。

図 4 は、縦軸は上昇速度(mm/s)、横軸は接触角度($^\circ$)を表す。図 4 から、接触角度が 90° のとき、カプセルは上昇速度が大きくなり、安定上昇している。また、他の接触角度では、上昇が不安定であり、バラツキが大きい。

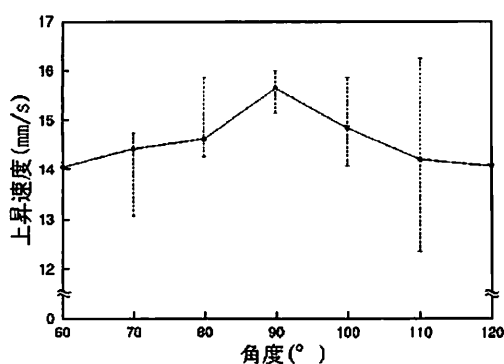


図 4 接触角度と上昇速度との関係

5-2 接触角度と降下速度との関係

次に、接触角度と降下速度との関係を調べる実験を行った。実験は、図 3 の実験において、降下速度が大きかった間欠パルスとして 7.5kHz の間欠周波数を与えた。その実験結果を図 5 に示す。図 5 は、縦軸は降下速度(mm/s)、横軸は接触角度($^\circ$)を表す。図 5 か

ら、接触角度が 90° のときだけカプセルは降下し、他の接触角度では、カプセルが細管に停止したまま、移動しなかった。

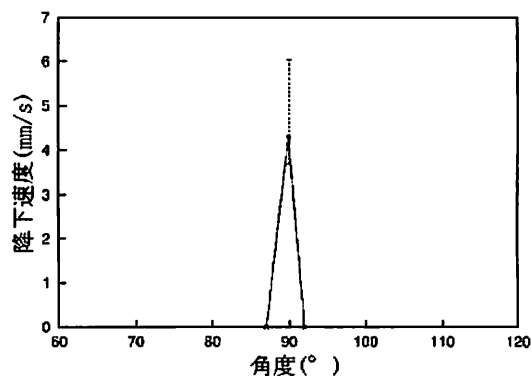


図 5 接触角度と降下速度との関係

6. 加振器の印加電圧と上下移動速度の変化

続いて、加振器と細管の接触角度を 90° に固定し、印加電圧を $10V_{p-p}$ から $80V_{p-p}$ まで $10V_{p-p}$ 間隔で変化させ、カプセルの上下移動速度の変化を計測する実験を行った。

実験方法は、加振器を細管に垂直方向に固定して、加振器の先端を細管に接触させる。カプセルを細管に挿入し、カプセルが上昇時には、加振器の下方 10mm にセットし、降下時には加振器の上方 10mm にセットして静止させる。細管を加振して、カプセルが 20mm 移動するのにかかった時間を計測して、計測時間から移動速度を算出する。次にこの実験を、加振器の印加電圧を $10V_{p-p}$ から $80V_{p-p}$ まで $10V_{p-p}$ 間隔で変化させて実験を行った。

6-1 印加電圧と上昇速度との関係

加振器の印加電圧と上昇速度との関係を調べた。上昇速度の実験には、上記の実験方法の他に、間欠パルスは入力しないで、40kHz の連続パルスを加振器に入力して実験を行った。その実験結果を図 6 に示す。図 6 は、縦軸は上昇速度(mm/s)、横軸は印加電圧(V_{p-p})を表す。図 6 から、加振器の印加電圧を大き

くすると、カプセルの上昇速度は大きくなり、安定した上昇移動を行った。また、印加電圧が $20V_{p-p}$ 以下では、移動速度は殆ど減少している。これは、加振器の加振力が小さいため、上昇する力が少ないため、上昇しなかったと考えられる。

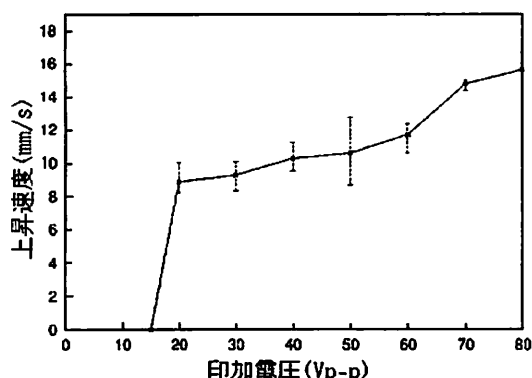


図6 印加電圧と上昇速度との関係

6-2 印加電圧と降下速度との関係

降下速度を測定するときは、間欠パルスとして、 $7.5kHz$ の間欠周波数を与えた。その実験結果を図7に示す。図7は、縦軸は降下速度(mm/s)、横軸は印加電圧(V_{p-p})を表す。図7から、印加電圧を大きくするとカプセルは高速降下するが、不安定な降下移動をする。また、印加電圧を $60V_{p-p}$ 近傍では安定降下移動している。

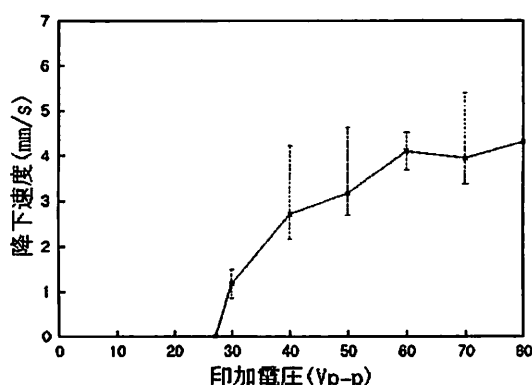


図7 印加電圧と降下速度との関係

7. 考察

(1) カプセルの上下移動と間欠周波数変化については、間欠周波数を変化させることによって、カプセルの上下移動方向が決まり、移動速度を変化させることが可能となった。

(2) 加振器の印加電圧を変化させると、加振器の振動の振幅が変化し、振幅が大きいときはカプセルの上下移動速度は大きくなることがわかった。また、印加電圧を大きくしていくと、上昇速度は大きくなり、移動は安定している。降下移動は $60V_{p-p}$ のとき最も安定移動した。 $60V_{p-p}$ 以外では、降下移動にバラツキが大きい。

(3) 加振器と細管との接触角度について、接触角度は垂直に近いほど移動速度は安定して、しかも速度が大きくなる。降下移動は接触角度が垂直方向から $2,3^\circ$ ずれただけで、カプセルは細管に引っかかって停止して動かなかった。

(4) 実験における問題点は、細管の上下を支持台上で固定しているため、カプセルが、細管の固定部分に近づくにつれて、細管の振動が減少し、カプセルの移動速度が小さくなる。この問題を解決するためには、加振器が加振点で細管を掴みながら加振する方法のほうが、上下移動距離が大きくなると思われる。

8. おわりに

本研究は、細管の振動エネルギーでカプセルを上下移動させることは可能となったが、細管の振動やカプセルの動きに対して、まだ力学的な理論解析は行われていない。さらに、移動原理を解明し、カプセルの構造を改善すれば、より精度の高いカプセル輸送技術が可能になると思われる。

本実験は細管を立てた状態での実験であるが、水平方向の移動にも可能であり、また、長距離移動でも細管の途中に加振器を連続的に設置し、加振器を順番に加振する方法も用いれば、可能であると考えられる。

本報告は、空のカプセルのみでの移動実験であり、物を詰めた状態でのカプセルの動きまでは考慮されていない。物を入れればカプセルの重量が大きくなり、移動に影響が出ることは考えられ、今後は、カプセル重量と移

動の変化について、実験と考察をする必要があると思われる。

最後に、本研究に対しご協力頂いた岡本崇氏に深甚なる謝意を表します。

<参考文献>

(1) 辻 裕：“空気輸送の基礎”、養賢堂、(1984)、137-138.

(2) スラリー輸送研究会：“スラリー・カプセル輸送技術要覧”、開発問題研究所、Vol.18、No.4、(2006)、57-62.

(3) 谷腰欣司：“超音波とその使い方”、日刊工業新聞社、(1994)、89-90.